



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA BIOMEDICA

**SISTEMI BIOELETTRONICI A SUPPORTO
DELLE CARENZE UDITIVE**

Relatore: Prof. / Dott Gaudenzio Meneghesso

Laureanda: Clizia Mochi

ANNO ACCADEMICO 2021 – 2022

Data di laurea 22/06/2022

Sommario

Introduzione.....	3
1. ANATOMIA DELL'ORECCHIO.....	4
1.1 Orecchio esterno	4
1.2 Orecchio medio	6
1.3 Orecchio interno	9
2. IL SUONO E LA SUA PERCEZIONE.....	12
2.1 Le onde sonore	12
2.2 Trasduzione del suono	13
2.3 Elaborazione del suono	14
3. PROBLEMATICHE UDITIVE.....	17
3.1 IPOACUSIA	17
3.1.1 Tipologie di Ipoacusia	18
3.1.2 Cause	19
3.2 ACUFENE	25
3.2.1 Cause	25
4. SISTEMI BIOELETTRONICI.....	26
4.1 Un po' di storia	26
4.2 Dispositivi di assistenza.....	28
4.3 Apparecchi acustici tradizionali	30
4.3.1 Funzionamento	31
4.4 Impianti dell'orecchio medio	32
4.5 Impianti cocleari	35
Conclusioni.....	39
Bibliografia:	41

Introduzione

Questa tesi si pone l'obiettivo di analizzare i sistemi bioelettronici presenti oggi sul mercato, a supporto delle carenze uditive. Prima di arrivare a questa analisi, viene illustrata nel dettaglio l'anatomia dell'orecchio. Successivamente, nel secondo capitolo ci si sofferma sulle caratteristiche fondamentali del suono e su come l'orecchio umano riesce ad interpretare e localizzare i segnali sonori. Il terzo capitolo illustra le problematiche uditive che possono insorgere in un soggetto: la perdita d'udito dovuta all'avanzamento dell'età, ad infezioni e ad ulteriori patologie che possono presentarsi già dalla nascita oppure che insorgono in seguito, la presenza di acufeni. In fine si conclude con l'analisi dei sistemi bioelettronici in commercio che hanno l'intento di risolvere i differenti tipi di ipoacusia, esaminando nel dettaglio apparecchi per orecchio esterno, medio e impianti cocleari.

Lo studio si è avvalso di una consultazione approfondita e di un confronto attento di pubblicazioni scientifiche internazionali degli ultimi 30 anni, spaziando nei vari ambiti affrontati nei capitoli: dall'anatomia dell'orecchio all'acustica, dalle patologie uditive agli apparecchi elettronici. È stata fatta una rassegna ragionata del materiale raccolto per poter rendere chiaro lo stato dell'arte delle tecnologie presenti ora sul mercato.

1. ANATOMIA DELL'ORECCHIO

L'orecchio è un organo di senso che assume due funzioni specifiche: è fondamentale per l'udito e per l'equilibrio umano. L'orecchio si può anatomicamente suddividere in tre sezioni: una esterna, una media e una interna. In questo capitolo verrà esaminata l'anatomia di ogni sezione.

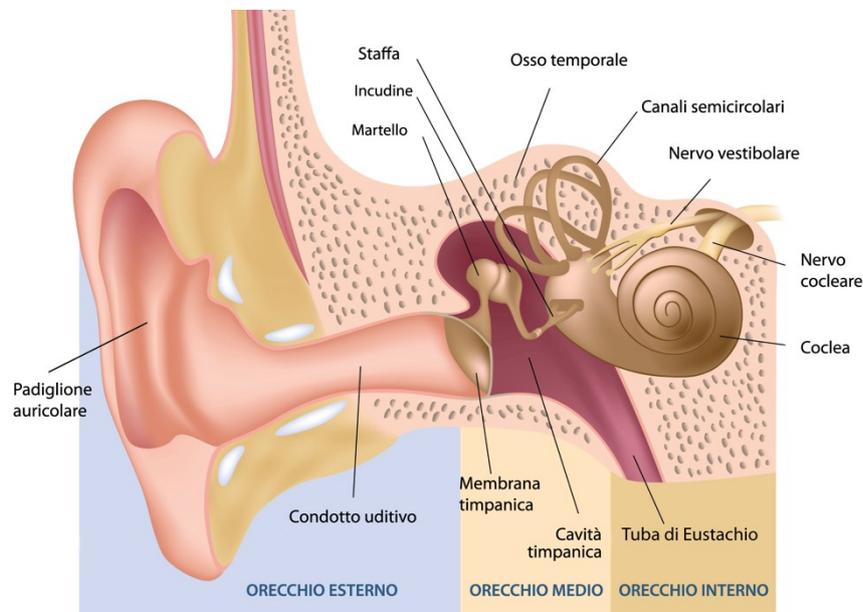


Figura 1.1: Anatomia orecchio.
Fonte:blumedical.com

1.1 Orecchio esterno ⁱ

L'orecchio esterno   il primo elemento acustico nella trasmissione delle onde sonore. Esso   composto da: padiglione auricolare e il condotto uditivo esterno (MAE).

Il **padiglione**   l'elemento che per primo capta i suoni, localizzandoli e trasmettendoli poi verso il condotto. Esso varia da specie a specie in localizzazione e forma. Nell'uomo   una espansione lamellare situata ai lati della testa, dietro l'articolazione temporo-mandibolare e la regione parotidea, sotto la regione temporale:   posizionato tra la linea orizzontale superiore che passa dal sopracciglio e la linea orizzontale inferiore che passa dal labbro superiore. La forma del padiglione varia da individuo ad individuo ed ogni diversit  influisce sulla qualit  dei suoni che giungono all'orecchio. In media misura 30-35 mm in larghezza e 60-65 mm in altezza: il rapporto tra queste due misure   l'indice auricolare di Topinard.

Strutturalmente il padiglione   diviso in faccia laterale e faccia mediale.

La faccia laterale   a sua volta composta da:

- La conchiglia, una profonda conca anteriore che prolunga il MAE;

- Lo scapha, composta da elice (piega curvilinea all'estremità dell'orecchio) e antelice (rilievo tra elice e conca che forma la piegatura del padiglione);
- Il trago, il rilievo anteriore dalla forma a valvola che protegge il condotto uditivo da traumi diretti;
- Il lobo, una formazione molle non cartilaginea, che rappresenta il terzo inferiore del padiglione.

La faccia mediale è anch'essa composta di due parti:

- Terzo anteriore, aderente alla parete laterale della testa;
- Parte posteriore, libera.

Queste due parti sono collegate dal solco retroauricolare (che funge da punto di scelta per le audioprotesi, in quanto permette di nascondere gli apparecchi esterni).

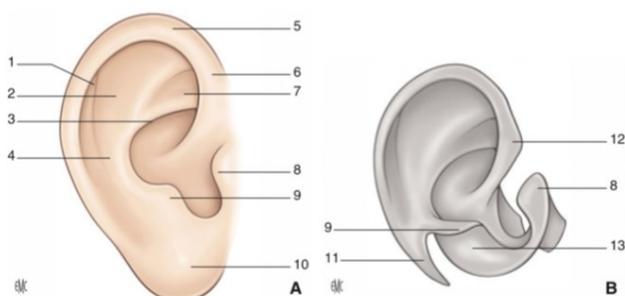


Figura 5. Faccia laterale del padiglione e del suo scheletro (A, B). 1. Scanalatura dell'elice; 2. ramo superiore dell'antelice; 3. ramo inferiore dell'antelice; 4. antelice; 5. elice; 6. radice dell'elice; 7. fossa scafoidea; 8. trago; 9. antitrigo; 10. lobo; 11. coda dell'elice; 12. spina dell'elice; 13. basso fondo della conca.

Figura 1.2: Faccia laterale orecchio esterno
Fonte: J.-M. Thomassin et al. 2016

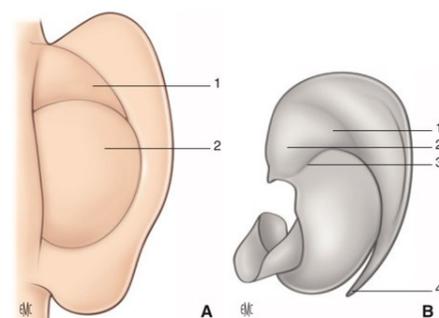


Figura 7. Faccia mediale del padiglione e del suo scheletro (A, B).
A. 1. Eminentia scaphae; 2. eminentia conchae.
B. 1. Eminentia scaphae; 2. solco trasverso dell'orecchio; 3. eminentia conchae; 4. coda dell'elice.

Figura 1.3: Faccia mediale orecchio esterno
Fonte: J.-M. Thomassin et al. 2016

Il condotto o **meato acustico esterno (MAE)** è un diretto prolungamento del padiglione auricolare ed è chiuso all'altra estremità dalla membrana timpanica, che lo separa dall'orecchio medio. Ha una lunghezza che varia tra 25 e 30 mm con un calibro che diminuisce fino all'unione dei tre quarti esterni e del quarto interno e aumenta poi verso il timpano. È composta da una struttura fibrocartilaginea che riveste il condotto osseo.

La struttura fibrocartilaginea costituisce il terzo esterno del condotto. Essa è composta da una scanalatura inferiore cartilaginea e una superiore fibrosa.

La struttura ossea costituisce i due terzi del canale uditivo e si prolunga in media per 16 mm. Si compone di due formazioni ossee: l'osso timpanico, in basso, è un anello a concavità

superiore incompleto, le cui estremità rigonfie sono dette corna o spine timpaniche, e la squama del temporale.

L'orecchio esterno ha dunque due funzioni: proteggere dall'esterno l'orecchio medio, in particolare la membrana timpanica, e, soprattutto, amplificare i suoni recepiti. Il padiglione ha il ruolo di amplificatore: amplifica le frequenze intorno a 5000-6000 Hz con un guadagno inferiore a 10 dB. All'interno del MAE avvengono dei fenomeni di risonanza che generano un'ulteriore amplificazione, soprattutto per le frequenze comprese tra i 2000 e 4000 Hz. A partire dal secondo anno di vita l'orecchio raggiungerà un valore asintotico di 2700 Hz e un guadagno massimo a questa frequenza di 15 dB. L'amplificazione massima di 12 dB a 7 kHz viene raggiunta quando l'onda è in linea con il MAE.

1.2 Orecchio medio ⁱⁱ

L'orecchio medio è una cavità piena d'aria composta dalla cassa timpanica e la catena delle tre piccole ossa (martello, incudine, staffa). La funzione dell'orecchio medio è quella di trasferire le onde sonore dal timpano all'orecchio interno: l'energia di queste onde viene trasformata in movimenti meccanici della struttura ossea dell'orecchio medio. L'orecchio medio è separato dall'orecchio esterno dalla membrana timpanica. Il timpano o membrana timpanica è diviso in due parti: la pars tensa e la pars flaccida.

La pars tensa presenta uno strato cuticolare esterno, uno strato mucoso e uno fibroso interno. Quest'ultimo strato è il responsabile della trasformazione delle onde sonore in vibrazioni: essendo poi in stretto contatto con il primo dei tre ossicini queste vibrazioni verranno passate all'intera catena che le andrà ad amplificare e a trasmettere all'orecchio interno.

L'orecchio medio comprende dunque tre parti:

- Annessi mastoidei
- Tuba uditiva (tromba di Eustachio)
- Cassa del timpano

Per annessi mastoidei si va ad intendere particolari cavità, contenenti aria e comunicanti tra di loro e con il cavo del timpano. Le cavità mastoidee sono principalmente accolte nell'apofisi mastoidea dell'osso temporale; le più importanti sono scavate nella parte del processo mastoideo formata dallo squamoso (cellule squamose) e in quella formata dal periotico (cellule petrose).

La tuba o tromba di Eustachio è un condotto di circa 35-45 mm per mezzo di cui l'orecchio si collega con il nasofaringe: solitamente la tromba di Eustachio è collassata, sigillando così l'orecchio medio; essa si apre solo momentaneamente durante masticazione, deglutizione o sbadiglio per riequilibrare la pressione dell'orecchio con quella atmosferica.

La cassa del timpano si presenta come una cavità di forma parallelepipedica irregolare a sei facce: cinque sono ossee e la sesta è in gran parte membranosa ed è formata dal timpano.

Le sei pareti sono :

- Parete laterale: parete membranosa;
- Parete mediale: parete labirintica;
- Parete superiore: parete tegmentale;
- Parete inferiore: parete giugulare;
- Parete anteriore: parete carotidea;
- Parete posteriore: parete mastoidea.

Si andrà ora ad analizzare l'anatomia delle tre piccole ossa che la cassa timpanica contiene.

I tre ossicini formano una catena che unisce la membrana timpanica con la finestra vestibolare.

Dall'esterno verso l'interno vi sono: martello, incudine e staffa.

Il **martello** è il più esterno e il più lungo, ha una forma di clava di cui si distinguono testa, collo, manico e due processi. La testa è situata sopra la membrana timpanica. È di forma ovoidale ed è sostenuta dal collo, che risulta corto e appiattito. Il manico fa seguito al collo e scende giù in obliquo. Tra il collo e il manico vi è a lato un'eminanza conica, il processo laterale, e anteriormente una sottile spina ossea, che è il processo anteriore.

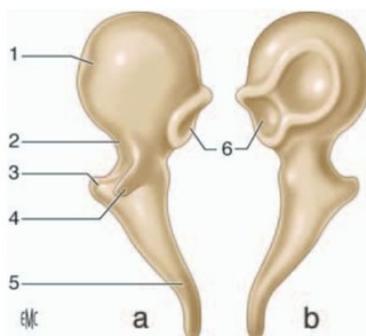


Figura 12. Malleus (martello). a. Vista anteriore; b. vista posteriore. 1. Testa; 2. collo; 3. processo laterale; 4. processo anteriore; 5. manico; 6. superficie articolare (articolazione incudomalleolare). (Secondo ^[12].)

Figura 1.4: Martello

Fonte: J.-M. Thomassin et al. 2008

L' **incudine** è situata mediamente e posteriormente al martello. È l' ossicino più pesante tra i tre; è composto da un corpo e due radici. Il corpo ha una forma cuboide con la faccia anteriore a forma di sella di cavallo che è a contatto con la testa del martello. Le due radici sono il ramo breve all'indietro e il ramo lungo che si prolunga con la stessa direzione del martello; quest'ultimo termina con un rigonfiamento arrotondato, il processo lenticolare, che si articola con la staffa.

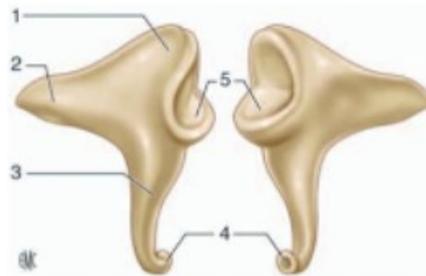


Figura 13. Incus (incudine). a. Vista laterale; b. vista mediale. 1. Corpo; 2. ramo breve; 3. ramo lungo; 4. processo lenticolare; 5. superficie articolare (articolazione incudomalleolare). (Secondo [12].)

Figura 1.5: Incudine

Fonte: J.-M. Thomassin et al. 2008

La **staffa** è l'ossicino più piccolo e più leggero. Situato nella fossetta della finestra vestibolare, è composto da una testa, due rami e una base, ricordando così la staffa di un cavaliere. La testa è quadrilatera: la sua faccia laterale è a contatto con il processo lenticolare di ramo lungo dell'incudine, la faccia mediale invece presenta prima uno strozzamento, il collo, e poi si prolunga nei due rami. I due rami formano un arco e collegano la testa con la base. Quest'ultima, anche detta finestra ovale, è una sottile lamina ossea di forma ovale che aderisce perfettamente con l'apparato vestibolare.

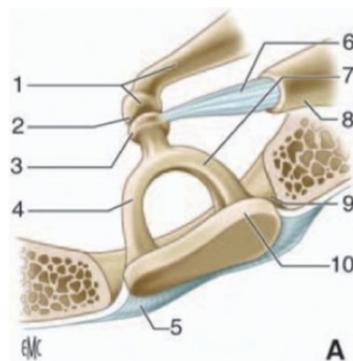


Figura 14. Stapes (staffa).
A. Staffa nella fossetta della finestra vestibolare. 1. Ramo lungo e processo lenticolare dell'incudine; 2. articolazione incudostapedica; 3. testa; 4. ramo anteriore; 5. legamento anulare; 6. tendine del muscolo stapedio; 7. ramo posteriore; 8. eminenza piramidale; 9. fossetta della finestra vestibolare; 10. base. (Secondo [12].)

Figura 1.6: Staffa

Fonte: J.-M. Thomassin et al. 2008

1.3 Orecchio interno ⁱⁱⁱ

L'orecchio interno è costituito da due strutture: apparato vestibolare e la coclea. L'apparato vestibolare non verrà approfondito in questa tesi in quanto è l'organo addetto all'equilibrio e non ha alcuna influenza sulla ricezione dei suoni.

La **coclea** è l'organo che contiene i recettori per l'udito. A differenza dell'orecchio medio, la coclea contiene del liquido ed è separata da esso tramite due dischi membranosi, la finestra ovale e la finestra rotonda. La coclea ha una forma che rimanda al guscio di una chiocciola: nell'uomo la coclea compie 2 giri e $\frac{3}{4}$ attorno al modiollo, il proprio asse, e raggiunge un diametro di circa 2 mm.

È costituita da tre canali paralleli:

- I. il dotto vestibolare,
- II. il dotto cocleare,
- III. il dotto timpanico.

Una piccola apertura detta elicotrema connette il dotto vestibolare e timpanico; il dotto cocleare è invece a fondo cieco, ma è connesso all'apparato vestibolare tramite una piccola fessura. Ogni dotto contiene un liquido di diversa composizione: i dotti timpanico e vestibolare contengono la perilinfa, di composizione ionica simile al plasma; il dotto cocleare contiene l'endolinfa, invece più simile al liquido intracellulare.

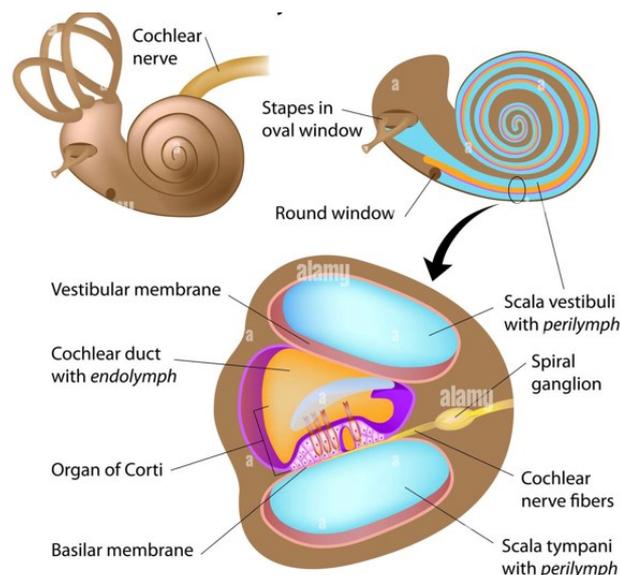


Figura 1.7: Struttura coclea
Fonte: Shutterstock

Nel dotto cocleare si trova l'organo del Corti, il vero organo neuro-sensoriale uditivo, che si occupa della trasduzione dell'impulso cinetico in elettro-chimico. Esso si poggia sulla membrana basilare ed è ricoperto dalla membrana tectoria. La membrana basilare è stretta e rigida nel tratto prossimo alla finestra ovale e rotonda, poi si allarga e diventa più flessibile.

L'organo del Corti è composto da due tipologie di cellule: recettoriali e di sostegno. Le cellule di sostegno hanno appunto la funzione di supporto per le cellule recettoriali. Ne esistono di quattro tipi: pilastri di Corti, cellule di Deiters, cellule di Hensen, cellule di Claudius.

Le cellule recettoriali sono ciliate e si distinguono in interne ed esterne: sulla membrana basilare è posta longitudinalmente (rispetto alla membrana basilare) una fila di cellule ciliate interne e tre file di cellule ciliate esterne. Si contano circa 3500 cellule ciliate interne e 15000 esterne. Sulla superficie apicale di ogni cellula si trovano disposte in modo ordinato di altezza ciglia rigide (20 per le interne e 60-100 per le esterne), le stereociglia, che sono completamente immerse nella membrana sovrastante (la membrana tectoria sopra citata). Le vibrazioni della finestra ovale vengono convertite in onde fluide nei canali della coclea che vanno a deformare le due membrane che formano a loro volta delle oscillazioni verticali. Queste oscillazioni piegano le ciglia delle cellule dell'organo del Corti.

Nonostante siano minori in numero, sono le cellule cigliate interne a tradurre le informazioni uditive in modo che possano essere comprese dalla corteccia uditiva. Esse sono in comunicazione con il 95% dei neuroni uditivi primari: ognuna è connessa a 10-30 fibre afferenti al nervo uditivo. Le cellule cigliate esterne invece provvedono ad amplificare il segnale di circa 50 dB tramite processi di feedback attivo.

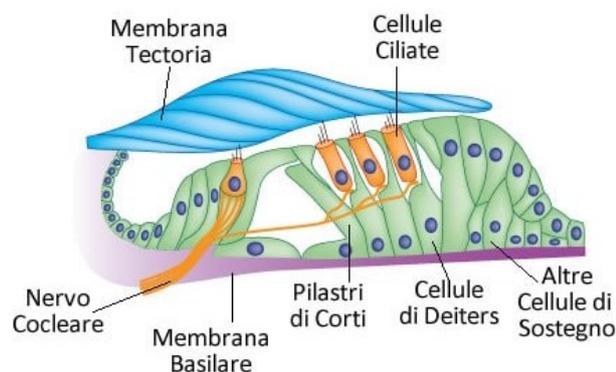


Figura 1.8: Struttura organo del Corti

Fonte: Shutterstock

Ogni cellula cigliata è collegata tramite dei dendriti al **nervo cocleare o uditivo**. Questo nervo è un ramo del nervo vestibolo-cocleare, l' VIII nervo cranico. Un chiarimento è necessario per capire come una qualsiasi informazione sensoriale raggiunge la corteccia cerebrale: in generale grazie ai neuroni sensoriali primari di un nervo un'informazione dalla periferia del corpo raggiunge in tronco encefalico. Il tronco encefalico è suddiviso, partendo dal basso, dal bulbo o midollo allungato, dal ponte e dal mesencefalo. L'informazione risale il tronco encefalico tramite i neuroni secondari e dal ponte arriva al cervelletto, mentre dal mesencefalo arriva al talamo e infine alla corteccia cerebrale.

Nel nostro caso, l'informazione sonora viene prima trasportata dai neuroni uditivi primari dalla coclea al nucleo cocleare che si trova nel midollo allungato. Ora intervengono i neuroni secondari che proiettano l'informazione fino a due nuclei sul ponte: uno ipsilaterale, dalla stessa parte del corpo, e l'altro controlaterale, la parte opposta (in modo che ciascuna parte del cervello riceva segnali provenienti da entrambe le orecchie). Da qui parte delle informazioni vanno al cervelletto (quelle deputate alla percezione e al mantenimento dell'equilibrio) e parte continuano la loro ascesa verso la corteccia celebrale facendo sinapsi nei nuclei del mesencefalo e del talamo. Ora raggiungono finalmente la corteccia celebrale.

2. IL SUONO E LA SUA PERCEZIONE

2.1 Le onde sonore ^{iv}

Le onde sonore sono create dalle vibrazioni di oggetti: il suono è un'onda di pressione nell'aria generata dalla vibrazione di un corpo, la sorgente sonora. Tutti i corpi elastici sono in grado di vibrare, dunque possono essere sorgenti sonore tutti i liquidi e i gas, ma non tutti i solidi. La velocità di propagazione con cui viaggiano le onde sonore dipende dal mezzo di propagazione: nel nostro caso è l'aria (la velocità del suono attraverso l'aria è di circa 344 metri al secondo). Quando la sorgente sonora vibra, urta le molecole d'aria, originando una cascata di compressioni ed espansioni delle molecole che creano delle onde sferiche concentriche, le onde sonore. Oscillazioni che, come queste, sono causate da una successione di aumenti e diminuzione di pressione sono definite longitudinali.

Dunque, per qualsiasi onda che si propaga a velocità $v = \lambda / T$ si possono definire:

- λ , **lunghezza d'onda**: distanza tra due punti corrispondenti dell'onda sonora;
- T , **periodo**: tempo impiegato nel percorrere λ ;
- f , **frequenza**: quante volta l'onda oscilla in un secondo ($1/T$), si misura in Hz. È associata all'**altezza** del suono: suoni a basse frequenze corrispondono a suoni percepiti dall'uomo come 'bassi', mentre suoni ad alte frequenze sono percepiti come suoni acuti;
- A , **ampiezza**: distanza tra la cresta e l'asse x , rappresenta il profilo di variazione di pressione dell'onda. Dall'ampiezza dipende l'**intensità** del suono, essa viene misurata in dB.
- **Forma** dell'onda: dà indicazioni sul timbro (o pitch) del suono; dunque, dà informazioni sulla identità e sulla qualità del suono. Se l'onda ha un andamento periodico allora rappresenta un suono, se così non fosse sta rappresentando un rumore.

Ogni suono viene contraddistinto grazie a tre precise sue caratteristiche: la frequenza, l'intensità, il timbro.

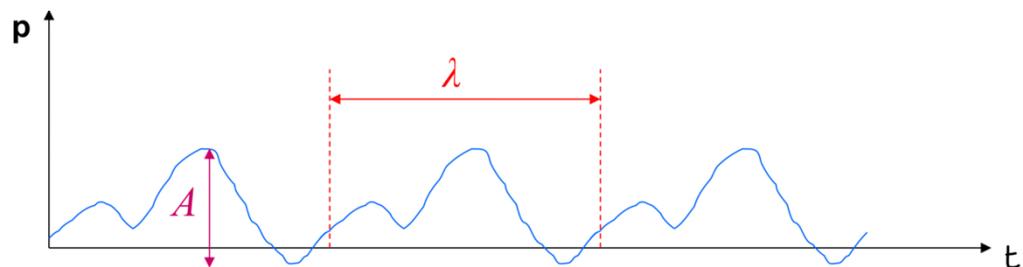


Figura 2.1: Rappresentazione di un'onda sonora

Fonte: L. Castellani 2013

Se un' onda sonora presenta variazioni regolari di pressione, ovvero variazioni che si ripetono nel tempo, allora il suono viene definito periodico. Se così non fosse allora il segnale viene percepito come rumore (come anticipato sopra).

In campo musicale un suono periodico viene descritto in termini di frequenza.

Quando un suono periodico di frequenza f viene scomposto in forme d'onda elementari, queste avranno le frequenze $f, 2f, 3f, 4f, \dots$. La sinusoidale di frequenza f è detta fondamentale, mentre le sinusoidi di frequenza multipla vengono dette parziali o armoniche. I suoni periodici si distinguono in suoni puri o composti da più armoniche. I primi sono composti da una sola componente sinusoidale, i secondi hanno invece più componenti sinusoidali e la frequenza fondamentale f è il massimo comune divisore della serie di frequenze che costituiscono lo spettro.

2.2 Trasduzione del suono ^v

Come già accennato nel precedente capitolo l'energia delle onde sonore viene coinvolta in varie trasduzioni nelle varie sezioni dell'orecchio. In breve, l'energia diventa prima una vibrazione meccanica e poi un' onda fluida. In questo modo apre i recettori sensoriali creando un flusso di ioni, e avviando così una scarica di potenziali d'azione nei neuroni sensoriali.

Nel dettaglio si possono individuare cinque fasi della trasduzione.

1. Prima trasduzione: le onde sonore che arrivano dall'esterno entrano nel condotto uditivo esterno fino a colpire la membrana timpanica che inizia a vibrare con la medesima frequenza.

Queste vibrazioni vengono poi trasmesse alla catena dei tre ossicini che si trova nell'orecchio medio, esse vengono amplificate e solo una piccolissima parte di energia viene persa a causa dell' attrito. Se l'orecchio è sottoposto ad un alto livello di rumore il muscolo tensore del timpano e lo stapedio, due piccoli muscoli dell'orecchio, intervengono in protezione all'orecchio interno che potrebbe venir danneggiato: fanno trazione sugli ossicini che diminuiscono i loro movimenti smorzando la conduzione delle vibrazioni. Quando la vibrazione arriva alla staffa essa viene trasmessa alla finestra ovale.

2. Seconda trasduzione: le vibrazioni della finestra ovale vengono convertite in onde fluide nei dotti della coclea.

Le nuove onde che si sono create fanno pressione sulla membrana tectoria (la membrana dove sono immerse le stereociglia) che si muove, muovendo con sé anche le cellule cigliate. In questa fase il segnale riceve un'amplificazione grazie a processi di feedback

tramite le cellule cigliate esterne. L'energia delle onde si disperde nell'orecchio medio grazie la finestra rotonda.

3. Terza trasduzione: i movimenti del dotto cocleare aprono e chiudono canali ionici creando segnali elettrici.

Le stereociglia sono unite tra loro da ponti a molla (tip links), dei ponti molecolari proteici. Essi influenzano l'apertura e la chiusura dei canali ionici (i canali che liberano i neurotrasmettitori) nella membrana delle ciglia. In posizione neutra solo il 10% dei canali ionici è aperto; dunque, viene rilasciato un basso livello di neurotrasmettitore. Quando invece le stereociglia si flettono l'una sull'altra, sotto stimolo delle onde fluide, i ponti a molla provocano l'apertura di canali cationici: ioni K^+ e Ca^{2+} fluiscono verso l'interno. La cellula si depolarizza e si aprono canali voltaggio dipendenti per il calcio.

4. Quarta trasduzione: i segnali elettrici modificano il rilascio del neurotrasmettitore.

L'apertura dei canali voltaggio dipendenti per il Ca fa aumentare il flusso di calcio, questo fa a sua volta aumentare il rilascio del neurotrasmettitore.

5. Quinta trasduzione: viene avviata la generazione di potenziali d'azione che inviano informazioni sul suono all'encefalo attraverso l'VIII nervo cranico.

Il neurotrasmettitore rilasciato incide sulla frequenza di scarica dei potenziali d'azione da parte del neurone sensoriale: se aumenta il livello di neurotrasmettitori aumenta anche la frequenza di scarica e viceversa.

2.3 Elaborazione del suono^{vi}

L'orecchio umano è sensibile solo ad un determinato range di frequenze: da 20 Hz a 16 kHz circa. Dunque, sotto i 15 Hz le variazioni di pressione vengono percepite come una rapida successione di impulsi e non come un unico suono; sopra i 20 kHz invece ci si trova nel campo degli ultrasuoni, i quali non vengono affatto percepiti dall'uomo.

L'uomo si affida a tre sensazioni primarie per classificare un suono: la frequenza, l'intensità e il timbro.

La codificazione della **frequenza** avviene nella membrana basilare della coclea. Le onde ad alta frequenza non sono trasmesse lontano lungo la coclea: esse determinano il massimo spostamento della membrana basilare in prossimità della finestra ovale. Le onde a bassa frequenza invece viaggiano lungo tutta la membrana basilare determinando il massimo spostamento della membrana basilare all'estremità distale, dove essa è più flessibile. Questa naturale differenziazione del luogo di ricezione permette di creare una vera e propria codifica spaziale (o tonotopica), in quanto frequenze diverse vengono rivelate da porzioni diverse della

membrana. Il codice spaziale viene riutilizzato nella corteccia uditiva, poiché i neuroni in base al punto da cui ricevono il segnale vanno ad attivare zone diverse nell'encefalo.

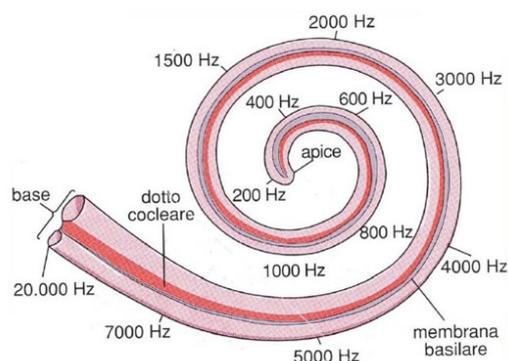


Figura 2.2: Membrana basilare con codifica tonotopica

Fonte: D. Stefani 2013

La codificazione dell'**intensità** inizia anch'essa nella coclea e dipende dal flusso di energia che accompagna ogni vibrazione: più intenso è il suono, maggiore sarà la frequenza di scarica con cui i neuroni sensoriali generano i potenziali d'azione.

L'elemento che caratterizza il **timbro** è in primo luogo lo spettro di potenza dello stimolo, in secondo luogo la forma d'onda, l'intensità e le caratteristiche temporali.

Insieme a queste sensazioni primarie, per classificare un suono l'uomo si affida anche alla direzionalità e alla consonanza e dissonanza.

La **direzionalità** è una sensazione legata alla differenza di fase con cui il suono giunge alle due orecchie dovuta dalla direzione di incidenza del suono. Due sono le vie acustiche dell'orecchio esterno per cui le vibrazioni aeree passano per entrare nell'organo uditivo: una via diretta che passa attraverso la conca e una indiretta che passa attraverso l'elice e l'antelice. Ciò implica un ritardo acustico di circa 0,2 ms che permette di localizzare la sorgente sonora verticalmente. L'angolo di incidenza delle onde sonore all'ingresso del MAE influisce sul livello di pressione all'ingresso del condotto che può variare da -6 a 12 dB, partendo da 2 kHz. Dunque, il padiglione è coinvolto nell'orientamento uditivo grazie alla differenza di ampiezza e fase tra le due orecchie. Per completare la localizzazione del suono è necessario analizzare le informazioni sensoriali inviate da entrambe le orecchie e poi un'elaborazione di esse da parte del SNC: tenendo in considerazione i segnali ricevuti dall'orecchio destro e sinistro, il cervello registra la differenza di tempo con cui il suono raggiunge le cavità uditive. Grazie a ciò, elabora

infine una rappresentazione tridimensionale che permette di determinare con una approssimata precisione la sorgente sonora.

La **consonanza** e la **dissonanza** sono due sensazioni provocate dalla sovrapposizione di più suoni, esse sono legate ad un condizionamento culturale.

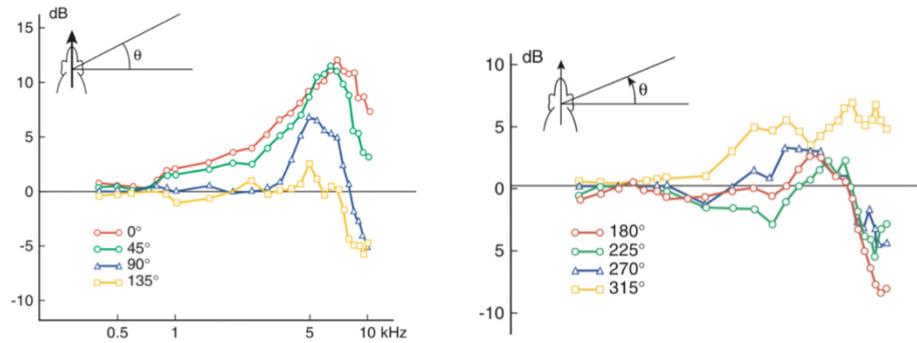


Figura 2.3: Influenza dell'angolo di incidenza delle onde sonore all'ingresso del condotto uditivo, in funzione alla frequenza

Fonte: J.-M. Thomassin et al. 2016

3. PROBLEMATICHE UDITIVE

3.1 IPOACUSIA^{vii viii}

L'ipoacusia è una patologia che interessa l'orecchio: essa provoca una riduzione della capacità uditiva dovuta a un danno all'apparato o alla degenerazione di uno o più dei suoi componenti. Può colpire a qualsiasi età e può essere causata da vari traumi, infiammazioni o malattie che verranno esplicitate in seguito. Come già anticipato il suono viene misurato tramite la scala logaritmica dei decibel: esso può essere espresso in dB SPL, dove 1000 Hz è il suono più basso che un individuo può udire, o in dB HL che corrisponde alla normale soglia uditiva. Clinicamente il volume di un suono è espresso in dB HL, ed è l'unità di misura a cui si riferisce questa tesi. Un sussurro misura circa 30 dB, una normale conversazione 60 dB e il rumore del traffico urbano 80 dB.

Cambiamenti nel volume o pressione del suono misurati da un audiometro possono essere espressi matematicamente come $N \text{ dB} = 20 \log P1/P2$, dove P1 e P2 sono le pressioni sonore da comparare.

Un individuo detiene un handicap uditivo quando presenta un'ipoacusia che interferisce in un bambino nell'apprendimento del linguaggio o in un adulto nell'abilità di sostenere una conversazione. La soglia di percezione di un suono per una persona normalmente udente è di 0 dB, quella per una persona che ha un handicap uditivo è approssimativamente di 25 dB.

Nel dettaglio un soggetto presenta una:

- Ipoacusia lieve se il deficit uditivo ha un abbassamento della soglia uditiva tra 20 e 40 dB;
- Ipoacusia media se il deficit uditivo ha un abbassamento della soglia uditiva tra 40 e 65 dB;
- Ipoacusia profonda se il deficit uditivo ha un abbassamento della soglia uditiva tra 65 a 85 dB;
- Sordità se il deficit supera gli 85 dB.

Il sintomo più comune a cui un portatore di handicap uditivo può essere soggetto è la difficoltà di percepire con chiarezza i suoni in situazioni quotidiane, come conversazioni in contesti rumorosi o in ambienti riverberanti, conversazioni al telefono, ascolto della voce di bambini.

3.1.1 Tipologie di Ipoacusia

Si possono distinguere differenti tipologie di perdita dell'udito:

1. **Ipoacusia neurosensoriale.**

Deriva dal danneggiamento delle cellule ciliate della coclea: come spiegato sopra, esse hanno il compito di trasferire le informazioni sul suono al cervello, tramite stimoli elettrici, ovvero i potenziali d'azione. Dunque, il loro non funzionamento comporta un errato passaggio di informazione al cervello o lo impedisce completamente.

2. **Ipoacusia centrale.**

Questa tipologia di sordità può essere causata da lesioni alle vie nervose che vanno dall'orecchio alla corteccia uditiva o danni alla corteccia stessa. È una condizione che accade meno frequentemente.

3. **Ipoacusia di conduzione** o trasmissione.

Avviene quando il suono non può essere trasmesso attraverso l'orecchio esterno o quello medio: c'è una qualche condizione che impossibilita l'arrivo delle informazioni sonore alla coclea. Spesso la coclea e il canale uditivo funzionano correttamente, è solo il segnale che non arriva a destinazione a causa di alcuni fattori che verranno discussi successivamente.

4. **Ipoacusia mista.**

È l'insieme dei sintomi della sordità neurosensoriale e di conduzione, fortunatamente poco comune.

5. **Ipoacusia fluttuante.**

È una perdita dell'udito caratterizzata dall'alternarsi di fasi di ipoacusia neurosensoriale improvvisa e di fasi in cui le capacità uditive sono normalmente performanti. La condizione è riconducibile a delle anomalie dei liquidi labirintici dovuta alla dilatazione dell'acquedotto del vestibolo (il dotto endolinfatico).^{ix}

6. **Ipoacusia uni-bilaterale.**

Rispettivamente l'ipoacusia può coinvolgere una o entrambe le orecchie.

7. **Ipoacusia improvvisa o insidiosa.**

L'ipoacusia solitamente insorge lentamente e progressivamente (insidiosa), ad esclusione di traumi o patologie che causano una perdita d'udito improvvisa. L'ipoacusia improvvisa è spesso accompagnata da acufeni e vertigini.

3.1.2 Cause

Un danno ad una qualsiasi parte dell'organo uditivo può risultare in una lieve o grave perdita di udito. Ricordiamo che generalmente problemi all'orecchio esterno e medio risultano in un'ipoacusia di conduzione, mentre problemi all'orecchio interno in un'ipoacusia neurosensoriale. Verranno ora elencati i fattori generali che possono impedire un corretto funzionamento delle varie componenti dell'orecchio:

- Orecchio esterno: la presenza di cerume, fluidi, corpi esterni o la crescita di corpi insoliti, infezioni del canale;
- Timpano: può essere buco, danneggiato o avere uno spessore di membrana troppo sviluppato;
- Orecchio medio: la presenza di fluidi o masse, infezioni, una pressione eccessiva;
- Ossicini: possono essere rotti, fissati o dislocati;
- Orecchio interno: le cellule ciliate possono essere danneggiate. Se le cellule ciliate danneggiate sono quelle esterne, allora è possibile intervenire con l'utilizzo di apparecchi acustici; purtroppo, se ad essere danneggiate sono le cellule ciliate interne si potrà intervenire solamente con l'impianto cocleare, trapassando interamente la coclea e stimolando direttamente il nervo acustico con segnali elettrici;
- Nervo acustico: può presentare un'infezione o infiammazione, ci può essere una massa che disturba il nervo rendendolo disfunzionale;
- Corteccia uditiva: il cervello può sviluppare patologie come la CAPD, central auditory process disorder, che impedisce una corretta "collaborazione" dell'organo dell'udito e del cervello.

Si analizzano ora più nello specifico quali sono le condizioni che portano un paziente alla perdita dell'udito:

A. Infezioni:

Segue una lista delle infezioni più comuni che un soggetto può sviluppare:

- Un'infezione dell'orecchio, il cui nome scientifico è otite, è un' infiammazione dell'orecchio, solitamente causata da batteri. Ci sono vari tipi di infezioni all'orecchio: otite esterna, media e interna. L'otite esterna è l'infiammazione del canale uditivo esterno, spesso è scaturita dal contatto con l'acqua. Risulta essere molto dolorosa e spesso si protrae a lungo.

L' otite media può essere acuta, con effusione o cronica con effusione. L'otite media acuta è la più comune e ha come sintomi: infezione e gonfiore di alcune parti dell'orecchio medio, liquido racchiuso dietro il timpano. L'otite con effusione

insorge alla fine di una generica infezione all'orecchio e provoca il riempimento dell'orecchio medio e del mastoide con un fluido sieroso. L'otite cronica non è invece causata da una infezione, ma anche in questo caso vi è del liquido che rimane nell'orecchio medio per un tempo prolungato che a fasi alternate si riassorbe o torna. Solitamente grazie l'utilizzo di antibiotici, l'otite media provoca solo un' ipoacusia di conduzione temporanea, ma una cura non tempestiva può causare gravi danni. Una prolungata pressione negativa nell'orecchio medio può risultare in una detrazione della membrana timpanica, un riassorbimento degli ossicini, nell'insorgenza di un colesteatoma (un'insolita raccolta di cellule epiteliali in prossimità del timpano o dei tre ossicini) che risulta poi nella distruzione degli ossicini, dei complessi mastoidei e alla fibrosi dell'orecchio medio con il rischio di incorrere in un' ipoacusia neurosensoriale.

L'otite interna coinvolge invece il labirinto osseo dell'orecchio interno (il quale si compone della chiocciola e del vestibolo). È molto dolorosa e può intaccare non solo le capacità uditive, ma anche quelle dell'equilibrio.

- La meningite batterica è un' infiammazione degli strati di tessuto che rivestono il cervello e il midollo spinale e dello spazio subaracnoideo. Nel 5-35 % dei pazienti essa comporta una ipoacusia neurosensoriale a causa dei danni che subiscono le cellule cigliate o il nervo uditivo.
- La sifilide è una malattia infettiva a trasmissione sessuale che può causare una ipoacusia neurosensoriale unilaterale o bilaterale.
- La tubercolosi è una malattia infettiva e contagiosa causata dal batterio *Mycobacterium tuberculosis*. Essa colpisce principalmente i polmoni, ma può coinvolgere anche altre parti del corpo come ghiandole, sistema nervoso e ossa. La tubercolosi dell'osso temporale può causare perforazioni multiple della membrana timpanica, otite media cronica e ascessi cervicali al muscolo sternocleidomastoideo, portando ad un' ipoacusia di conduzione e neurosensoriale.
- La labirintite virale è un' infiammazione del labirinto e di altre strutture dell'orecchio interno. Essa può causare ipoacusia neurosensoriale medio/grave.

B. Patologie genetiche

L'incidenza delle malattie genetiche che portano ad ipoacusia non è chiara. Se si prende però in considerazione che la predisposizione genetica all' ipoacusia dovuta all'avanzamento dell'età (presbiacusia) è data da cause genetiche, allora i fattori ereditari sono la più prominente causa di perdita d'udito. È stato inoltre stimato che almeno il 50% di sordità totale nei bambini è dovuta a cause genetiche. Nei casi di sordità congenita ad esordio precoce il modello di ereditarietà è autosomico recessivo nel 60-70% dei casi, autosomico dominante nel 20-30%, X-linked nel 2%. Le anomalie genetiche risultano molto più spesso in un'ipoacusia neurosensoriale, piuttosto che a quella di conduzione.

La patologia che porta ad ipoacusia di connessione più spesso trasmessa geneticamente è l'otosclerosi: in media 1% della popolazione ne è affetto in entrambe le orecchie. La sclerosi è una patologia che causa un'anormale indurimento dei tessuti: l'abilità delle ossa di rinnovare i propri tessuti rimpiazzando le cellule vecchie con delle nuove viene a mancare. In particolare, nel caso delle orecchie, gli ossicini si fissano e, non riuscendo più a vibrare, non possono passare il segnale sonoro all'orecchio interno.

Altre patologie genetiche che causano ipoacusia neurosensoriale sono la sindrome di Alport, la sindrome di Waardenburg e la sindrome di Usher.

C. Ototossicità

L'ototossicità descrive i danni dell'orecchio interno dovuti all'uso di sostanze chimiche che si trovano sia nei medicinali su prescrizione che su quelli da banco. Una grande varietà di farmaci comunemente usati hanno proprietà ototossiche. I più noti sono: antibiotici aminoglicosidici, i diuretici dell'ansa, agenti salicilati e antineoplastici come il cisplatino, la eritromicina. La maggior parte dei farmaci ototossici causano una perdita di udito (spesso asimmetrico) danneggiando la coclea, in particolare le cellule ciliate. Ci sono studi che mostrano che alcune sostanze ototossiche si concentrano dentro l'orecchio interno portando ad una ipoacusia neurosensoriale progressiva anche se il paziente ha interrotto l'amministrazione del farmaco.

D. Trauma

Seguono varie tipologie di traumi che possono causare ipoacusia.

- Lesioni al cranio o all'osso temporale possono risultare in un' ipoacusia di connessione o neurosensoriale o entrambe. Solitamente traumi longitudinali all'asse dell'osso temporale causano una frattura della membrana timpanica, distruzione del canale uditivo esterno e della catena dei tre ossicini: dunque un'ipoacusia di connessione. Invece, traumi trasversali che distruggono la coclea o il nervo acustico causano più comunemente una sordità neurosensoriale permanente.

- Un soggetto è sottoposto a traumi acustici quando viene esposto a rumori ad alta intensità, siano anche sotto i livelli approvati dall' OSHA, Occupational Safety and Health Administration (ovvero rumori che superano i 90 dB per un periodo prolungato). Una prolungata esposizione al rumore o l'esposizione ad un suono impulsivo molto intenso, come un'esplosione, porta ad un'ipoacusia neurosensoriale permanente e spesso anche a tinnito. Più precisamente un suono molto forte causa una violenta fluttuazione della perilinfa ed endolinfa. Dunque, la membrana basilare e la membrana tettoria si contraggono fortemente, separando così le cellule cigliate dalle stereociglia: ora le cellule non riescono più a ricevere una stimolazione effettiva dalle vibrazioni. Può anche capitare che le cellule cigliate si separino dalla membrana basilare, distruggendo parte delle sinapsi con il nervo. Purtroppo, le sinapsi rimaste non riescono a mantenere una funzionalità ottimale e perdono la loro abilità codificativa spaziale del suono: la tonotopicità della membrana è intaccata.^x

- Il barotrauma è una lesione che avviene a causa di un repentino aumento di pressione in concomitanza al malfunzionamento del tubo di Eustachio, magari a causa di un'infezione o un'allergia. Dunque, durante un barotrauma l'orecchio medio è esposto ad una prolungata pressione negativa che risulta in un'effusione sierosa, sanguigna e dolorosa nel canale. Fortunatamente l'ipoacusia di connessione causata è temporanea e quasi mai permanente.
Pericolosa è anche la puntura lombare, poiché la rapida diminuzione della pressione perilinfatica nella colonna vertebrale potrebbe causare ipoacusia.

- La rottura della finestra ovale o finestra rotonda, le membrane che separano l'orecchio medio, riempito di aria, e l'orecchio interno, contenente fluido, può essere

molto dannoso. Tra le cause vi possono essere: trauma cranico, sollevamento di un peso elevato, grandi sforzi, barotrauma. Una lesione ad una delle due membrane causa un' ipoacusia neurosensoriale progressiva o fluttuante e danneggia l'apparato vestibolare, l'organo responsabile dell'equilibrio. Questa "fistola perilinfatica" può essere riparata con un innesto di tessuto stabilizzando così la perdita di udito ed eliminando i problemi di equilibrio.

E. Tumori e malattie degenerative

Una grande varietà di tumori, sia primari che metastatici, può far insorgere ipoacusia sia neurosensoriale che di connessione, danneggiando rispettivamente l'orecchio medio o l'orecchio interno e il nervo uditivo. I tumori primari più comuni sono: neuroma acustico, chemodectoma, carcinoma a cellule squamose, adenocarcinoma e carcinoma basocellulare. Tra questi il più diffuso è il neuroma acustico: questo tumore è causato da una sovrapproduzione di cellule di Schwann, le cellule che avvolgono le fibre nervose. Crescendo, questa massa causa ipoacusia unilaterale, tinnito, vertigini e problemi di equilibrio. I tumori metastatici più comuni sono: adenocarcinoma della mammella nelle donne e carcinoma prostatico e renale negli uomini.

Per quanto riguarda le malattie degenerative, ce ne sono varie, di cause ignote, che possono portare alla perdita dell'udito. La sindrome di Ménière insorge da una disfunzione dell'omeostasi dei liquidi nell'orecchio interno ed è caratterizzata da ipoacusia fluttuante, vertigini episodiche, tinnito.

Anche la presbiacusia, ipoacusia associata all'avanzamento dell'età, è considerata una malattia degenerativa, questa patologia è il risultato di effetti a cui un soggetto può essere stato sottoposto durante il corso della vita (trauma acustico, ototossicità, infiammazioni e altre cause genetiche). Più di un terzo della popolazione sopra i 75 anni di età ne è affetto. La presbiacusia comporta la perdita di cellule cigliate, neuroni e dell'irradiazione sanguigno del sistema uditivo periferico, quindi un'ipoacusia neurosensoriale.

DISEASE	TYPE OF HEARING LOSS	APPROXIMATE INCIDENCE OR PREVALENCE (IF KNOWN)
Effusions and infections		
Otitis media with effusion	Conductive	80% of children between 0–6 yr of age
Chronic otitis media	Conductive, sensorineural	18/100,000 population/yr
Syphilis (congenital and acquired)	Sensorineural	—
Tuberculosis	Conductive, sensorineural	—
Bacterial meningitis	Sensorineural	Approximately 25% of patients
Viral infection, maternal rubella, cytomegalic inclusion disease, other?	Sensorineural	—
Genetic and developmental disorders		
Waardenburg's syndrome	Sensorineural	Approximately 1–2% of patients with congenital deafness
Usher's syndrome	Sensorineural	Approximately 3–10% of patients with congenital deafness
Alport's syndrome	Sensorineural	Approximately 1% of all patients with genetic deafness
Otosclerosis	Conductive, sensorineural	Approximately 3–8/1000 whites
Autosomal dominant or recessive sensorineural deafness	Sensorineural	—
Drug-induced ototoxicity		—
Aminoglycosides	Sensorineural	
Loop diuretics	Sensorineural	
Cisplatin	Sensorineural	
Salicylates	Sensorineural	
Trauma		
Skull fracture	Conductive, sensorineural	—
Penetrating injury of ear	Conductive, sensorineural	—
Acoustic trauma (exposure to noise)	Sensorineural	—
Radiation-induced injury	Sensorineural	—
Immune-mediated diseases		
Wegener's granulomatosis	Conductive, sensorineural	—
Giant-cell arteritis	Sensorineural	—
Lupus erythematosus	Sensorineural	—
Polyarteritis nodosa	Sensorineural	—
Primary neoplastic processes		
Acoustic neuroma	Sensorineural	1.5–850/100,000 population
Squamous-cell carcinoma	Conductive, sensorineural	—
Chemodectoma	Conductive, sensorineural	—
Metastatic lesions		
Carcinoma of breast, prostate, or kidney	Sensorineural	—
Idiopathic and degenerative disorders		
Presbycusis	Sensorineural	30% of U.S. population over 70 yr of age
Meniere's disease	Sensorineural	10–160/100,000 population
Sudden idiopathic sensorineural loss	Sensorineural	—
Circulatory disorders		
Vertebrobasilar insufficiency	Sensorineural	—
Embolism	Sensorineural	—
Hypercoagulable state	Sensorineural	—

Figura 3.1: Tabella con le cause di ipoacusia

Fonte: Nadal, Joseph B. 1993

3.2 ACUFENE^{xi xii}

L'acufene o tinnito è una percezione sonora non legata ad un suono generato da una fonte esterna. È un suono percepito da un soggetto che lo descrive come un ronzio, un fruscio, un fischio o un tintinnio. Chiunque può averlo percepito almeno una volta nella vita, ma se l'acufene si ripete con costanza e va ad impattare la vita di un paziente, allora è necessario consultare un medico. Studi mostrano che circa il 10.1% degli adulti ne è affetto, di cui il 2.8% lo considera moderatamente disturbante, l' 1.6% molto disturbante e lo 0.5% non riesce a condurre normalmente la propria vita a causa di esso.

Il tinnito può essere soggettivo quando è percepito dal soggetto stesso e basta, oppure può essere oggettivo, quando un osservatore può udire il suono (quest'ultimo è molto poco comune). Questo disturbo può coinvolgere entrambe le orecchie o solo una, può essere localizzato dentro la testa oppure percepito come una fonte sonora esterna. Alle volte può essere un suono ritmico e pulsatile. Il tinnito pulsatile può essere in sincronia con il battito cardiaco, il che significherebbe che ha origini vascolari, oppure asincrono, che invece significherebbe che è dovuto a delle piccole contrazioni dei muscoli dell'orecchio medio o del palato.

3.2.1 Cause

I fattori di rischio per lo sviluppo di acufene sono prima di tutto l' esposizione a forti suoni/rumori, ma possono contribuire anche il fumo, l'obesità, abuso di alcolici, utilizzo di determinate sostanze chimiche, trauma cranici, artrite e ipertensione. La patologia può insorgere anche a causa di malattie otologiche quali l'otosclerosi, la sindrome di Ménière e il neuroma acustico. Spesso il tinnito è accompagnato da altre problematiche, in particolare depressioni, crisi di ansia, e può innescare l'ipoacusia, specialmente ad alta frequenza, e/o l'iperacusia, ovvero un'ipersensibilità a determinati suoni che comunemente non infastidiscono soggetti sani (l' 86% dei pazienti che riporta iperacusia riporta anche acufeni).

Anormalità della coclea possono essere ciò che innesca gli acufeni, ma è la successiva cascata di cambiamenti neurali che li mantiene. Un aumento spontaneo del firing rate dei neuroni nel sistema uditivo centrale è una possibile spiegazione di questi fischi.

4. SISTEMI BIOELETTRONICI

Nel capitolo precedente sono state analizzate le patologie che possono risultare nella perdita dell'udito in un paziente. Ora verranno esposte le soluzioni a queste problematiche presenti oggi sul mercato. Quando si tratta di ipoacusia di connessione a volte è possibile intervenire chirurgicamente, ma complessivamente si ricorre quasi sempre all'utilizzo di apparecchi acustici. Un apparecchio acustico è un dispositivo elettronico che viene indossato dentro o dietro l'orecchio. Aiuta un soggetto affetto da ipoacusia a sentire meglio, sia in contesti rumorosi che silenziosi, cosicché egli possa comunicare, ascoltare e partecipare senza limitazioni a tutte le sue attività quotidiane. Purtroppo, solo una su cinque persone che avrebbero bisogno di un apparecchio acustico effettivamente ne usufruisce. Oggi esistono un gran numero di dispositivi disponibili: sta al paziente, guidato da un audiologo, sceglierne uno. Questa scelta è personalizzata ad ogni soggetto e naturalmente dipende dalla tipologia di ipoacusia (è errato pensare che dispositivi più costosi sono più efficaci, in quanto ogni dispositivo ha determinate caratteristiche che potrebbero sposarsi o meno con le problematiche di un paziente).

4.1 Un po' di storia^{xiii}

I primi tentativi di creazione di dispositivi per aiutare l'udito risalgono a centinaia di anni fa. Nel XIII secolo venivano usati oggetti rudimentali come corna svuotate di mucca o di ariete; solo nel XVIII secolo iniziarono ad essere inventati i primi veri e propri dispositivi. Il più famoso era in cornetto acustico: una sorta di tromba la cui estremità più piccola veniva appoggiata sull'orecchio. Essa non amplificava i suoni, ma era in grado di canalizzarli in modo che, una volta appoggiato sull'orecchio di un paziente, questo potesse sentire più chiaramente. Beethoven stesso utilizzò questo dispositivo quando iniziò a perdere l'udito. Simile al cornetto acustico c'era anche lo stetoscopio. C'erano poi anche i ventagli acustici e i tubi fonici, strumenti che erano in grado di amplificare i suoni, ma che allo stesso tempo erano grossi ed ingombranti e quindi difficili da trasportare.

Alla fine del XIX secolo iniziò a crescere la domanda per dispositivi che potevano essere nascosti: Rein progettò i primi auricolari acustici, che venivano ingegnosamente nascosti dai capelli. Avevano svariate forme e comprendevano dispositivi per amplificare il suono. Altri dispositivi venivano oppure nascosti in divani, vestiti o accessori, tutte strategie per celare l'handicap uditivo.

Nel 1870 Thomas Edison inventò un trasmettitore in carbone per il telefono che era in grado di amplificare il segnale elettrico con un guadagno di circa 15 dB: era il primo apparecchio acustico elettronico. Anche se per le persone soggette da ipoacusia sarebbe necessario

un'amplificazione di circa 30 dB, nonostante il range di frequenze captate fosse limitato e il dispositivo producesse spesso dei brusii, l'invenzione di Edison pavimentò il commercio degli apparecchi acustici in carbone. Solo a partire dagli anni 20 del 900 entrò sul mercato un prodotto di degna concorrenza: l'apparecchio a valvola termoionica. Questo dispositivo convertiva prima il suono in un segnale elettrico, lo amplificava (con un guadagno fino a 70 dB) e lo trasferiva al ricevitore. Erano dunque più efficaci degli apparecchi in carbone, ma erano anche molto più ingombranti.

Nel 1948 venne inventato il transistor che rivoluzionò il mercato degli apparecchi acustici in quanto un transistor può attivare e disattivare un flusso di corrente e quindi ogni apparecchio poteva avere più impostazioni; inoltre richiedeva meno energia per il funzionamento e aveva meno distorsione. Fu così che finalmente negli anni 50 si arrivò al design più tradizionale degli apparecchi che possono essere indossati dietro o dentro l'orecchio. Negli anni successivi la ricerca continuò per fare in modo che le dimensioni degli apparecchi si riducessero ancora di più e stessero al passo con tutte le innovazioni tecnologiche: la fine degli apparecchi a transistor fu segnata dall'era degli apparecchi acustici digitali (anni 60). Al giorno d'oggi gli apparecchi acustici sono completamente programmabili, e quindi flessibili e personalizzabili. Verranno ora analizzati i dispositivi disponibili sul mercato.

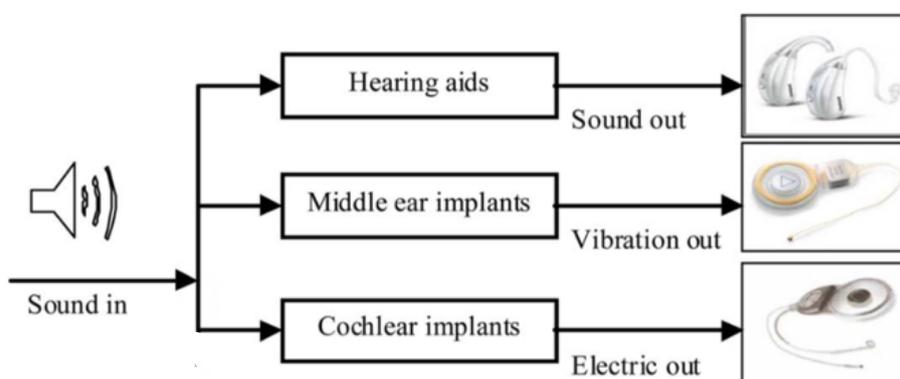


Figura 4.1: Apparecchi e impianti oggi sul mercato
Fonte: Fan-Gang Zeng et al. 2008

4.2 Dispositivi di assistenza^{xiv}

Con il termine *dispositivo di assistenza* ci si riferisce a qualsiasi dispositivo che può aiutare qualsiasi soggetto affetto da perdita di udito, voce o qualsiasi altra patologia che gli impedisce di comunicare con gli altri, in modo che egli possa continuare a vivere una vita pseudonormale, senza essere ostacolato dalla sua patologia.

Ci sono vari tipi di dispositivi di assistenza:

- *ALDs: assistive listening devices*. Questi amplificano i suoni che un soggetto patologico non riesce a udire chiaramente. Vengono usati negli apparecchi acustici o impianti cocleari;
- *AAC: augmentative and alternative communication devices*. Essi aiutano nel campo della comunicazione: si può intendere una semplice lavagna da disegno ad un computer che scrive un discorso;
- *Alerting Devices*. Questi avvisano un soggetto con ipoacusia che un evento sta accadendo.

Si analizzano ora le varie tipologie di ALDs :

- ❖ Sistemi a circuito ad induzione.

Esso utilizza energia elettromagnetica per trasmettere suono.

È composto da quattro parti:

1. Fonte sonora;
2. Amplificatore;
3. Hearing loop (piccolo circuito che funge da trasmettitore);
4. Ricevitore indossato dal soggetto oppure una bobina elettromagnetica. (Una bobina elettromagnetica o *telecoil* è una bobina che viene installata all'interno di numerosi impianti acustici. Essa riceve i segnali elettromagnetici da parte dell' *hearing loop* e li trasforma di nuovo in onde sonore per l'apparecchio acustico o l'impianto cocleare).

Il suono amplificato viaggia attraverso l' *hearing loop* creando un campo elettromagnetico che viene a sua volta ricevuto dal ricevitore o dalla bobina magnetica. Siccome il suono viene rilevato direttamente dal ricevitore, esso risulta essere molto più chiaro: i rumori di background vengono eliminati.

L'*hearing loop* può essere fisso, ovvero impiantato in determinati luoghi, oppure a volte può essere anche portatile. La cosa fondamentale per il corretto funzionamento di questo

sistema è che il soggetto indossi il ricevitore ad una distanza ravvicinata dall' *hearing loop*.

❖ Sistemi FM.

Questi sistemi utilizzano segnali radio per trasmettere suoni amplificati. La fonte sonora, ad esempio una persona che parla, deve indossare un piccolo microfono ed un trasmettitore; l'ascoltatore invece indosserà un ricevitore sintonizzato ad una specifica frequenza o canale. Se l'ascoltatore ha già un *telecoil*, ad esempio inserito nel suo apparecchio acustico o nell' impianto cocleare, allora dovrà indossare anche un cavo attorno al collo (*neckloop*) oppure dietro l'impianto (*silhouette inductor*) per convertire il segnale captato in un segnale che può essere rilevato dal *telecoil*: ovvero in onde magnetiche. I sistemi FM sono molto utili, per esempio nelle classi di scuola o molti altri luoghi pubblici, e possono funzionare fino a 100 metri di distanza e passare attraverso i muri; l'unico accorgimento è dover scegliere correttamente il canale su cui ascoltare, per evitare di intercettare segnali indesiderati.

❖ Sistemi a infrarossi.

Essi utilizzano le luci a infrarossi per trasmettere le onde sonore: il trasmettitore indossato dalla fonte sonora converte il suono in un segnale luminoso e lampeggiando lo trasmette al ricevitore indossato dall' ascoltatore. Infine, il ricevitore tramuta questo segnale nuovamente in un segnale sonoro. Come detto sopra, coloro che hanno già un *telecoil* nei loro apparecchi acustici o impianti cocleari dovranno indossare un *neckloop* o un *silhouette inductor*. Il segnale ad infrarossi non può passare attraverso i muri, per questo viene usato in situazioni dove vengono condivise informazioni confidenziali. La limitazione di questo sistema è che non può essere utilizzato in ambienti con molte luci, come stanze molto illuminate o l'esterno.

❖ Amplificatori personali.

Gli amplificatori personali sono dispositivi di piccola taglia, per esempio come un cellulare, e grazie ad un microfono (che può essere anche direzionale) amplificano solo le onde sonore e riducono i rumori di background. Il suono amplificato viene captato da un ricevitore che l'ascoltatore sta indossando. Questi vengono utilizzati per guardare la TV, quando si è all'aperto, quando si viaggia in macchina: in generale quando i sistemi sopra spiegati non sono disponibili.

4.3 Apparecchi acustici tradizionali ^{xv}

In questo paragrafo per apparecchi acustici tradizionali si intendono quelli applicati nell'orecchio esterno. Vengono utilizzati per coloro che accusano un'ipoacusia neurosensoriale, ovvero che hanno le cellule cigliate dell'orecchio interno danneggiate.

Un apparecchio acustico è composto da tre parti: microfono, amplificatore e altoparlante. L'apparecchio riceve il suono tramite il microfono che converte le onde sonore in segnali elettrici e li trasmette all'amplificatore. Quest'ultimo aumenta la potenza dei segnali e li passa all'orecchio grazie all'altoparlante. A questo punto le cellule cigliate ancora sane captano il segnale amplificato e lo convertono nel segnale neurale.

Ci sono tre basici stili di apparecchi acustici che differiscono per grandezza, posizione e il grado di amplificazione.

- Dietro l'orecchio (BTE, behind the ear).
Dati ai pazienti che accusano una perdita di udito medio profonda. Gli apparecchi BTE sono composti da un astuccetto di plastica contenente i componenti elettronici indossato dietro l'orecchio. Questo è connesso ad un auricolare che è inserito nella cavità dell'orecchio esterno attraverso cui passa il segnale sonoro prima di raggiungere l'orecchio interno. Siccome l'auricolare va a tappare il canale, alcuni soggetti preferiscono usare un design open-fit per non avere la percezione di avere una voce "tappata". Questo design è più piccolo e al posto dell'auricolare vi è un tubo sottile che viene inserito nel canale uditivo.
- Nell'orecchio (ITE, in the ear).
Questi apparecchi si inseriscono completamente dentro l'orecchio esterno. L'astuccio che contiene le componenti elettroniche è fatto di plastica dura. Il segnale viene recepito da un microfono, ma spesso quest'ultimo viene sostituito da un *telecoil*, che riceve il segnale attraverso il circuito elettrico dell'apparecchio. Il *telecoil* è preferibile in quanto funziona meglio per le conversazioni al telefono e, laddove è installato un particolare sistema sonoro, aiuta a sentire meglio in strutture pubbliche con tanta gente. Gli apparecchi ITE vengono dati a soggetti con ipoacusia medio-grave, ma non ai bambini poiché gli astucci devono venir sostituiti quando il bambino cresce.
- Nel canale (ITC e CIC).
Di questi dispositivi individuiamo gli ITC, nel canale, in cui l'apparecchio è personalizzato in modo da calzare perfettamente nel canale del soggetto; vi sono poi gli

CIC, completamente nel canale, simili ai precedenti, ma più piccoli e quasi nascosti nel canale. La loro taglia così piccola limita la loro potenza e volume, per questo non sono raccomandati a coloro che accusano una ipoacusia molto acuta.



Figura 4.2: stili degli apparecchi acustici per orecchio esterno

Fonte: NIH/NIDCD

4.3.1 Funzionamento

Gli apparecchi acustici funzionano in modo diverso in base alla tipologia di elettronica usata. (Questa classificazione vale per qualsiasi apparecchio, per orecchio esterno, medio e interno).

- Apparecchio analogico: converte le onde sonore in segnali elettrici che vengono poi amplificati. Questi dispositivi vengono personalizzati per soddisfare i bisogni specifici di chi li utilizza; infatti, spesso hanno più di un singolo programma o impostazione. Vengono programmati da un audiologo tramite un computer cosicché si possano cambiare le impostazioni in base all'ambiente in cui l'ascoltatore si trova.
- Apparecchio digitale: converte le onde sonore in codici numerici e poi amplifica il segnale. Il codice ha anche informazioni riguardo il timbro o il volume del suono; quindi, può essere programmato per amplificare determinate frequenze rispetto ad altre. L'elettronica digitale dà all'audiologo più flessibilità e l'apparecchio viene personalizzato ancora più nel dettaglio. Questa tipologia è la più costosa.
- Apparecchi analogici programmabili digitalmente: utilizzano i convenzionali circuiti analogici per processare il suono, ma poi lo modificano con circuiti di controllo digitale. In questo modo il suono può essere alterato con più flessibilità rispetto agli apparecchi

solo analogici. Anche qui ci sono varie impostazioni e l'ascoltatore può decidere quale usare in base al luogo in cui si trova.

4.4 Impianti dell'orecchio medio ^{xvi}

Gli apparecchi tradizionali hanno varie caratteristiche non apprezzate da chi li utilizza. Per prima cosa c'è l'aspetto estetico: il fatto che siano visibili non è apprezzato affatto. In secondo luogo, ci sono poi tanti altri fattori "scomodi" riguardo agli apparecchi tradizionali: l'occlusione del canale, il guadagno spesso insufficiente nelle alte frequenze, il fatto che non possono essere bagnati, il bisogno di una costante manutenzione del dispositivo. Questo ha spinto la ricerca a sviluppare dispositivi che trapassassero direttamente la trasmissione sonora per meato esterno. Come? Trapiantandoli nell'orecchio medio. Due sono le tecnologie per dispositivi impiantabili che vengono utilizzate: piezoelettriche ed elettromagnetiche. La prima utilizza la proprietà di certi cristalli di cambiare la loro configurazione se stimolati da tensione; la seconda sfrutta il movimento di strutture metalliche impiantate sulla catena di ossicini quando stimulate da un campo magnetico.

Seguono ora due esempi di impianti **semi-impiantabili** .

[1] Il *Vibrant Soundbridge (VSB)* è composto da due parti: internamente, impiantato chirurgicamente sull'incudine o sulla finestra ovale o rotonda, c'è il ricevitore o demodulatore, detto *vibrating ossicular prosthesis (VORP)*; esternamente vi è un processore audio circolare che rimane saldo allo scalpo grazie alla trazione magnetica che vi è tra le due parti. Nel dettaglio la componente esterna dell'apparecchio presenta due microfoni, un microprocessore alimentato da una batteria e una antenna. I microfoni captano il segnale e lo trasformano in un segnale elettrico, questo viene poi processato e passato alla parte interna del sistema per induzione magnetica. Il VORP possiede anch'esso un' antenna che capta il segnale inviato dal microprocessore. Il demodulatore è ricoperto da una bobina (fatta da un cavo in oro ricoperto da silicone) che lo collega ad un *floating mass trasducer (FMT)*, un cilindro elettromagnetico che contiene un micro-magnete in grado di vibrare. Quando il segnale elettrico attraversa il cavo, un campo magnetico viene generato: esso fa vibrare il micro-magnete del FMT. La frequenza e l'intensità di questa vibrazione sono le informazioni del suono che si vogliono trasmettere poi all'orecchio interno. Il FMT è saldo all'incudine tramite una clip in titanio in modo che rimanga perpendicolare all'ossicino: in questo modo, quando il FMT vibra, la vibrazione è amplificata e passata all'intera catena e il segnale riesce così a raggiungere l'orecchio interno. Il VSB è particolarmente utile quando i vantaggi dell'amplificazione

convenzionale sono limitati a soglie uditive da 70 a 80 dB, ma non riesce a migliorare l'udito per le frequenze di 125, 250, 500 Hz.

Viene usato per pazienti con severa ipoacusia neurosensoriale o di trasmissione o mista.

Il sistema VSB presenta molti vantaggi rispetto agli apparecchi tradizionali:

- ✓ Recupero delle capacità uditive: una volta installato correttamente il dispositivo il paziente beneficia di una stimolazione dell'orecchio interno assai migliore di quella preoperatoria;
- ✓ Il fatto che una parte del dispositivo sia esterno permette al paziente di poter aggiornare il processore con le tecnologie più recenti;
- ✓ Non c'è occlusione del canale uditivo
- ✓ Non c'è effetto feedback in quanto il sistema non utilizza un altoparlante per trasmettere il suono. Dunque, c'è anche una amplificazione dei suoni con un alto timbro;
- ✓ Compatibile con scansioni MRI;
- ✓ Il sistema è reversibile (può essere rimosso con abbastanza facilità).

[2] Il sistema *Maxum* comprende un processore audio esterno, posizionato nel canale o dietro l'orecchio, e un dispositivo interno impiantabile. Il processore esterno comprende un microfono, un amplificatore ed elettrodi connessi al dispositivo interno. Quest'ultimo viene impiantato vicino al timpano, ad una specifica angolazione che permette la migliore amplificazione possibile, e consiste in un astuccio in titanio sigillato ermeticamente per contenere un magnete e in un collare elicoidale che collega l'astuccio all' articolazione incudostapediale. La differenza tra il sistema *Maxum* e i dispositivi tradizionali è che il *Maxum* utilizza un processore elettromagnetico piuttosto che i principi elettroacustici. Il processore riceve il suono, lo amplifica, lo processa mantenendo integro il segnale elettrico che viene passato ad una bobina elettromagnetica nel canale. Quest'ultima crea un campo elettromagnetico che avvolge tutto l'orecchio medio e che fa vibrare il magnete sopraccitato. La vibrazione, sincrona al suono originale, fa vibrare la staffa e passa dunque il segnale all'orecchio interno.

Usato per pazienti che presentano ipoacusia neurosensoriale moderata/severa, sconsigliato per ipoacusia di conduzione o centrale, in presenza di un'infezione all'orecchio medio come l'otite media, con perforazione del timpano o un acufene impossibilitante.

Seguono ora due esempi di apparecchi **completamente impiantabili**.

[1] Il dispositivo *Carina* è composto da:

- 1) Sistema impiantato: ovvero un trasduttore e una capsula (che comprende un processore, due microfoni, batteria e dispositivo di programmazione dell'impianto). I due microfoni sono posizionati in una configurazione antagonista: un microfono è all' esterno della capsula e registra i suoni ambientali, invece quello interno i suoi del corpo del paziente.
La capsula viene impiantata nel corpo o nel processo corto dell' incudine, il trasduttore nell'antro mastoideo, una piccola cavità scavata nella parte mastoidea dell'osso temporale.
- 2) Telecomando. Quando è in contatto con la bobina (ovvero il trasduttore) dell'unità impiantata trasmette dei dati in radiofrequenza che permettono di accendere o spegnere il dispositivo, cambiare le impostazioni e controllare il volume.
- 3) Carica batterie. Una batteria carica dura 32 ore. La vita della batteria di è almeno 10 anni, dopo questo tempo l'intera capsula elettronica deve essere sostituita. Il trasduttore invece non necessita di essere cambiato.

Il funzionamento del *Carina* è il seguente: il suono è captato dal microfono e passato al processore dentro la capsula; questo lo analizza, lo amplifica secondo le impostazioni e lo converte in segnale elettrico che viene passato al trasduttore. Il trasduttore converte il segnale in energia meccanica che fa vibrare la zona di interesse (sia essa una delle due finestre o la catena di ossicini).

Il *Carina* è adatto a pazienti con ipoacusia neurosensoriale, ma sconsigliato a coloro che hanno malattie ossee degenerative, malattie dell'orecchio medio, disturbi del sistema nervoso centrale.

[2] L' *Esteem* è un dispositivo basato sulla tecnologia piezoelettrica. Esso non comprende un microfono in quanto il suono viene ricevuto direttamente dal timpano o dalla catena di ossicini. Nel dettaglio l' *Esteem* consiste in due trasduttori (il *sensor* impiantato sull' incudine e il *driver* sulla staffa), un processore analogico contenente una batteria.

Il *sensor* riceve le onde sonore in forma meccanica e le trasduce in segnali elettrici; il processore filtra e amplifica i segnali elettrici e il *driver* converte questi segnali di nuovo in energia meccanica che viene dunque passata all'orecchio interno.

Questo dispositivo è adatto ai pazienti adulti con ipoacusia neurosensoriale bilaterale severa, non per coloro con ipoacusia di conduzione o centrale.

4.5 Impianti cocleari ^{xvii xviii}

La ricerca ha dimostrato che una delle cause più comuni della perdita dell'udito è il danneggiamento delle cellule cigliate dell'orecchio interno: per questo motivo con gli impianti cocleari l'uomo ha come obiettivo simulare la stimolazione dei neuroni uditivi, completamente bypassando l'orecchio esterno, medio e anche parte di quello interno. La sfida è riuscire ad interpellare i neuroni giusti per far arrivare alla corteccia uditiva informazioni sul suono. Per fare questo è necessario ricordare come una coclea sana lavora usando un "codice spaziale", ovvero come le cellule cigliate che si trovano all'apice della coclea captano le alte frequenze, mentre quelle che si trovano alla base i suoni a bassa frequenza (vedi *Figura 2.2*). La differenza tra un apparecchio acustico tradizionale e un impianto cocleare è che il primo semplicemente amplifica i suoni in modo che anche le parti dell'orecchio riescano a riceverli, il secondo invece bypassa le parti danneggiate e stimola direttamente i neuroni. Naturalmente per poter installare un impianto cocleare è necessario che vi siano ancora sufficienti neuroni uditivi funzionanti in prossimità dei vari elettrodi.

In generale ogni impianto cocleare è costituito da:

Unità esterna:

- Batteria;
- Microfono;
- Processore: unità digitale di elaborazione del segnale, amplificatore di potenza, trasmettitore ad onde radio (RF);

Unità interna:

- Ricevitore RF;
- Stimolatore ermeticamente sigillato alimentato dai segnali RF (non ha batteria);
- Array di elettrodi collegati da cavi;
- Circuito di feedback (per il monitoraggio le attività neurali ed elettriche e poi trasmetterle all'unità esterna).

Le due unità rimangono fisse dietro l'orecchio perché quella interna contiene un magnete che attira quella esterna.

Il funzionamento di un impianto è il seguente: in primo luogo il suono viene captato da un microfono e trasmesso al processore. Quest'ultimo processa il segnale che riceve attraverso

quattro filtri passabanda: il segnale acustico digitale viene diviso in quattro differenti bande di frequenza. Il segnale che viene mandato in output dal processore è un segnale a radiofrequenza. Il trasmettitore passa questo segnale al ricevitore dell'unità interna. Il segnale arriva allo stimolatore che lo decodifica, lo converte in una corrente elettrica (di ampiezza proporzionale all'energia della banda da cui proveniva il segnale) e lo invia agli elettrodi grazie a dei cavi. Gli elettrodi stimolano i neuroni che sparano impulsi neurali che verranno tradotti come suoni dal cervello.

Il processore contiene anche delle unità di memoria che immagazzinano informazioni specifiche di setting di ogni paziente. Una volta che l'apparecchio è stato impiantato esso viene regolato usando un programma che interfaccia un computer e il processore esterno; vengono salvate le informazioni di differenti settaggi come "map" sul computer. Vengono poi scaricate nella memoria del processore le *map* utili al paziente.

Un impianto cocleare può riprodurre correttamente le sensazioni di volume e timbro al cervello. Il volume del suono può essere controllato modulando l'ampiezza dello stimolo della corrente: infatti il volume dipende dal numero di fibre nervose attivate e dal loro firing rate. Una corrente maggiore stimola un maggior numero di fibre e viceversa. Il timbro invece dipende da quale porzione della coclea viene stimolata: esso viene riprodotto correttamente con lo stimolo dei giusti elettrodi. Gli elettrodi vicino all'apice verranno stimolati per suoni a bassa frequenza e quelli vicino alla base per quelli ad alta frequenza.

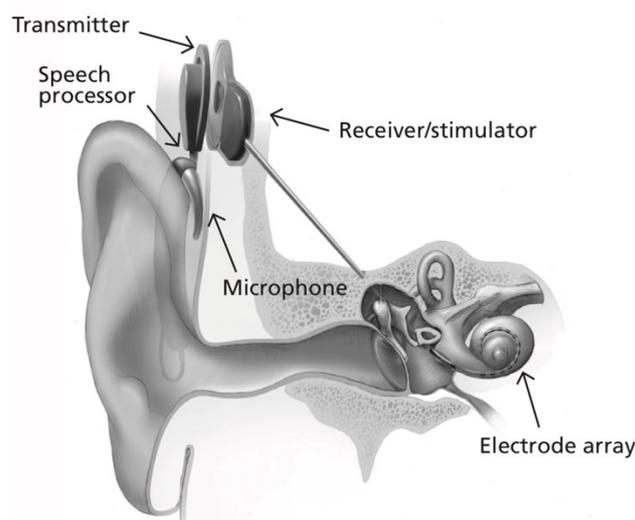


Figura 4.3: Orecchio con impianto cocleare
Fonte: NIH/NIDCD

Esistono varie tipologie di impianti cocleari che differiscono per quattro caratteristiche:

1. Elettrodi: numero, configurazione, tipologia etc. ;
2. Tipo di stimolazione: analogica o pulsatile;
3. Modalità di trasmissione del segnale: transcutaneo o percutaneo;
4. Elaborazione del segnale: rappresentazione della forma d'onda o estrazione di funzioni.

1. Elettrodi

Il design degli elettrodi per gli impianti cocleari è grande oggetto di studio. Infatti, ci sono vari fattori che possono influenzare il segnale: il posizionamento degli elettrodi, il loro numero, la distanza che c'è tra uno e l'altro, l'orientazione rispetto al tessuto d'interesse e la loro configurazione. Gli elettrodi vengono spesso posizionati sulla scala timpanica in quanto qui possono imitare al meglio la codifica spaziale della coclea; alternative posizioni sono vicino alla finestra rotonda o sulla superficie del nucleo cocleare. Per quanto riguarda il numero di elettrodi, più ce ne sono, più la codifica spaziale risulterà accurata.

La configurazione prediletta è quella bipolare: questa, infatti, riesce a minimizzare la propagazione del segnale quando viene stimolato un elettrodo (per esempio nella configurazione monopolare quando si stimola un elettrodo, inevitabilmente vengono coinvolti anche quelli attorno a lui).

2. Tipo di stimolazione

Le informazioni possono essere trasmesse in forma analogica o pulsatile.

Nella stimolazione analogica la forma d'onda viene rappresentato da un segnale analogico elettrico. Questo segnale viene poi trasmesso simultaneamente a tutti gli elettrodi di un array. Così facendo il cervello ricaverà le informazioni che necessita da questo segnale, ma la stimolazione simultanea crea il rischio di una sovrapposizione di due canali diversi.

Nella stimolazione pulsatile gli elettrodi ricevono il segnale attraverso una serie di impulsi consecutivi. Il vantaggio di questa stimolazione è il poter minimizzare l'interazione dei canali, poiché gli impulsi possono essere trasmessi senza sovrapposizioni.

3. Modalità di trasmissione

Per ora esistono due modi con cui il trasmettitore esterno può passare il segnale al ricevitore interno. La modalità più gettonata è quella transcutanea: questa utilizza stimoli in radiofrequenza. Questa modalità previene eventuali infezioni cutanee, ma ha lo svantaggio di dover intervenire per forza chirurgicamente nel caso in cui un elettrodo si danneggiasse e inoltre non è compatibile per le scansioni MRI.

Dall'altra parte c'è invece la modalità percutanea in cui gli elettrodi ricevono stimoli direttamente attraverso connessioni a spina. I vantaggi sono: non ci sono altre componenti elettroniche impiantate oltre agli elettrodi, una grande flessibilità e trasparenza di segnale.

4. Elaborazione del segnale

Esistono varie tecniche di elaborazione del segnale: alcune puntano a preservare l'informazione della forma d'onda, altre l'informazione dell' envelope e altre le caratteristiche spettrali.

Device	Numero elettrodi	Spazio tra elettrodi	Configurazione elettrodi	Tipo di stimolazione	Modalità di trasmissione
Ineraid	6	4 mm	Monopolare	Analogica	Percutanea
Necleus	22	0.75 mm	Bipolare	Pulsatile	Transcutanea
Clarion 1.0	8	2 mm	Monopolare/ Bipolare	Analogica/ Pulsatile	Transcutanea
Med-EI	12	2.4 mm	Monopolare	Pulsatile	Transcutanea

Figura 4.4: Tabella delle caratteristiche degli impianti cocleari in mercato
Fonte: Fan-Gang Zheng et al 2008

Conclusioni

A confronto dei primi apparecchi acustici ideati, oggi la tecnologia è molto avanzata: i prodotti sul mercato sono specializzati e puntano a risolvere specifici disagi uditivi. Per questo è fondamentale ricorrere all'aiuto di un audiologo nel momento della scelta del proprio apparecchio, in quanto il ventaglio di prodotti disponibili è ampio, e ogni tipologia di ipoacusia deve essere trattata con diversi approcci. Non c'è sempre una correlazione lineare sul prezzo di un apparecchio e la qualità del recupero dell'udito, in quanto tecnologie diverse risolvono il malfunzionamento di aree diverse dell'orecchio. Inoltre, una volta selezionato l'apparecchio più appropriato, per renderlo ancor più efficace è fondamentale regolarlo/sintonizzarlo in base alla percezione uditiva del paziente. In questo modo, è molto spesso possibile recuperare un udito pressoché ottimale.

Ringraziamenti

Ringrazio il mio relatore, per la sua prontezza e disponibilità.

Ringrazio la mia amica Stella, per avermi incoraggiato e supportato in quest'ultimo anno e per credere sempre in me.

Ringrazio i miei amici, per aver riempito questi tre anni di splendidi ricordi e per aver condiviso con me memorabili esperienze.

Ringrazio la mia famiglia, per tutte le opportunità che mi ha dato e per avermi sempre sostenuto.

Bibliografia:

- ⁱ J.-M. Thomassin, P. Barry, Anatomia e fisiologia dell'orecchio esterno, EMC - Otorinolaringoiatria, Volume 15, Issue 4,2016,
- ⁱⁱ J.-M. Thomassin, P. Dessi, J.-B. Danvin, C. Forman, Anatomia dell'orecchio medio, EMC - Otorinolaringoiatria, Volume 7, Issue 3,2008,
- ⁱⁱⁱ Silverthorn, D. U. (2017). Fisiologia umana. Un approccio integrato. (S. Rufini, C. Perego, & B. Colombini, Trans.). Milano: Pearson.
- ^{iv} Drioli, C., & Orio, N. (2012). Elementi di acustica e psicoacustica.
- ^v Silverthorn, D. U. (2017). Fisiologia umana. Un approccio integrato. (S. Rufini, C. Perego, & B. Colombini, Trans.). Milano: Pearson.
- ^{vi} Drioli, C., & Orio, N. (2012). Elementi di acustica e psicoacustica.
- ^{vii} Nadol, Joseph B. (1993). Hearing Loss. *New England Journal of Medicine*, 329(15), 1092–1102. doi:10.1056/NEJM199310073291507
- ^{viii} <https://www.amplifon.com/it/malattie-orecchio/ipoacusia-e-calo-uditivo>
- ^{ix} <http://www.tanzariello.it/index.php/gola/146-studio-prof-a-tanzariello/orecchio/patologia/orecchio-interno/ipoacusia-neurosensoriale-dell-adulto-a-rapida-insorgenza/787-ipoacusia-fluttuante>
- ^x Ding, Tonghui; Yan, Aihui; Liu, Ke (2019). What is noise-induced hearing loss?. *British Journal of Hospital Medicine*, 80(9), 525–529. doi:10.12968/hmed.2019.80.9.525
- ^{xi} Baguley, D., McFerran, D., & Hall, D. (2013). Tinnitus. *Lancet (London, England)*, 382(9904), 1600–1607. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(13\)60142-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)60142-7)
- ^{xii} Thomassin, J.-M.; Rossi, M.E.; Reyre, A. (2016). Acufeni oggettivi. EMC - Otorinolaringoiatria, 15(2), 1–10. doi:10.1016/s1639-870x(16)77592-1
- ^{xiii} Valentinuzzi ME. Hearing Aid History: From Ear Trumpets to Digital Technology. *IEEE Pulse*. 2020 Sep-Oct;11(5):33-36.
- ^{xiv} <https://www.nidcd.nih.gov/health/assistive-devices-people-hearing-voice-speech-or-language-disorders>
- ^{xv} <https://www.nidcd.nih.gov/health/hearing-aids>
- ^{xvi} Bittencourt, Aline; Burke, Patrick; Jardim, Isabela; Brito, Rubens; Tsuji, Robinson; Fonseca, Anna; Bento, Ricardo (2014). Implantable and Semi-Implantable Hearing Aids: A Review of History, Indications, and Surgery. *International Archives of Otorhinolaryngology*.
- ^{xvii} <https://www.nidcd.nih.gov/health/cochlear-implants>
- ^{xviii} Loizou, P.C. (1999). Introduction to cochlear implants. , 18(1), 32–42.